

Estudo sobre as Sub-portadoras Piloto na Estimação e Equalização de Canais no Domínio da Frequência em sistemas OFDM

Ivo B. F. ALMEIDA

Depto. de Comunicações, Instituto Nacional de Telecomunicações
Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais 37540-000, Brasil

e

Estevan M. LOPES

Depto. de Comunicações, Instituto Nacional de Telecomunicações
Santa Rita do Sapucaí, Minas Gerais 37540-000, Brasil

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo sobre os efeitos causados pela variação na quantidade de sub-portadoras piloto transmitidas no processo de estimação da resposta em frequência do canal de comunicação e no processo de equalização e detecção coerente dos símbolos transmitidos em receptores de sistemas OFDM. Para tal investigação serão propostos dois diferentes cenários de simulação numérica através da ferramenta computacional MATLAB®. Serão apresentadas análises qualitativas e quantitativas através de gráficos e cálculos matemáticos.

Palavras-chave: Estimação de canal, Equalização no domínio da frequência, Interpolação, Multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM), Sub-portadoras piloto.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de modulação por múltiplas portadoras têm sido utilizada em sistemas de comunicação digital sem fio devido as suas características de eficiência espectral e robustez ao desvanecimento causado por múltiplos percursos [1]. A técnica de multiplexação por divisão de frequências ortogonais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é implantada em padrões de TV digital, como o DVB (*Digital Video Broadcasting*) [2], ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*), SBTVD (Sistema Brasileiro de TV digital) [3], em sistemas de redes locais sem fio, como o IEEE 802.11 (*Wi-Fi*) e em sistemas celulares de quarta geração, como o *LTE-Advanced* [4]. A técnica OFDM ainda é uma das candidatas a ser implantada na camada física da futura rede celular de quinta geração (5G) que tem previsão de iniciar a operação no ano 2020 [5],[6].

Utilizando a técnica OFDM dados são transmitidos de forma paralela, ou seja, um feixe de dados serial de alta taxa é dividido em uma série de sub-feixes de taxas mais baixas que serão posteriormente modulados em diferentes sub-portadoras ortogonais [7],[3]. Cada sub-portadora irá possuir uma banda menor e um tempo de símbolo maior do que a do sinal original. Consequentemente, o tempo do símbolo se torna maior do que o tempo de coerência e a banda menor que a banda de coerência do canal [8]. Isto leva à um desvanecimento plano em cada sub-portadora, e assim o processo de equalização no domínio da frequência é facilitado [9],[10]. Através destas características o sistema OFDM é capaz de mitigar efeitos causados pelos canais

de transmissão sem fio [4]. Alguns efeitos são, por exemplo, atenuações rotações de fase distintas para cada valor de frequência [11]. A equalização tem por objetivo compensar as variações na amplitude e fase de cada sub-portadora. Porém, o equalizador necessita de informações prévias do canal. Estas informações são obtidas através de sub-portadoras pilotos que devem ser processadas no receptor por um conjunto composto pelo estimador e interpolador [8],[7],[12].

Portanto, a técnica OFDM proporciona robustez a um sistema submetido a um canal com múltiplos percursos. Para proporcionar tal robustez é necessário um método confiável para estimação da resposta em frequência do canal [4]. Como tal resposta é obtida através do envio de sub-portadoras piloto, um estudo sobre os efeitos causados pela variação do número de pilotos transmitidas torna-se fundamental.

O objetivo deste artigo é investigar o efeito da variação do número de sub-portadoras piloto transmitidas na estimação e interpolação da resposta em frequência de canais de comunicação e na equalização de símbolos recebidos para a posterior detecção coerente dos mesmos.

A estrutura do artigo apresenta na segunda seção um resumo sobre o funcionamento de um sistema OFDM genérico, a terceira seção apresenta o funcionamento do conjunto estimador, interpolador e equalizador, a quarta seção apresenta simulações numéricas onde serão estudados dois cenários, nos quais ocorre uma variação no número sub-portadoras piloto transmitidas e serão observados seus efeitos na estimação, interpolação e equalização. Finalmente serão apresentadas as conclusões na quinta seção.

2. SISTEMA DE COMUNICAÇÃO OFDM

Nesta seção é apresentado o diagrama em blocos de um sistema OFDM genérico que utiliza sub-portadoras piloto para a estimação e interpolação da resposta em frequência do canal, e posteriormente utiliza esta resposta estimada para a equalização dos símbolos transmitidos. A Figura 1 ilustra o diagrama em blocos do sistema OFDM utilizado como referência neste artigo [9],[7],[12].

Os dados a serem transmitidos são modulados em símbolos complexos através do mapeamento M-QAM (*M-ary Quadrature Amplitude Modulation*) ou M-PSK (*M-ary Phase Shift Keying*) [4]. Em seguida é feita a paralelização em conjuntos de N símbolos e são adicionadas as sub-portadoras piloto. A seguir é realizada a operação IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) de N pontos que mapeia os símbolos

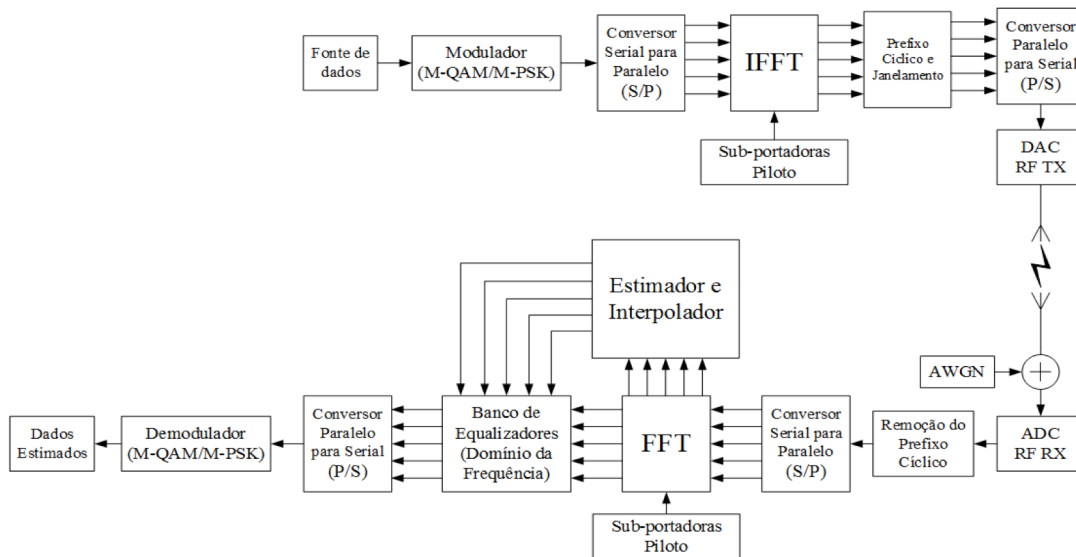


Fig. 1. Sistema de comunicação OFDM genérico empregando um equalizador no domínio da frequência.

provenientes do bloco Modulador (M-QAM/M-PSK) em símbolos OFDM [1],[8], então é adicionado o PC (Prefixo Cíclico), que tem por objetivo diminuir a IES (Interferência Entre Símbolos) e assim manter a ortogonalidade entre as sub-portadoras, o tamanho do PC é dependente da relação entre o atraso de propagação do canal e o tempo de duração do símbolo OFDM [8]. Os símbolos OFDM são então convertidos para forma serial. O sinal digital resultante é convertido para forma analógica, e em seguida trasladado para frequência de transmissão e finalmente enviado para interface sem fio (Figura 1). No receptor do sistema, o sinal proveniente do canal sem fio é convertido para banda básica e digitalizado [3]. O PC é removido, e em seguida o sinal é paralelizado para ser realizada a operação FFT (*Fast Fourier Transform*). Os símbolos provenientes do bloco FFT são enviados ao banco de equalizadores e os símbolos correspondentes às sub-portadoras piloto são enviados ao estimador da resposta em frequência do canal, logo este responde com os coeficientes que serão utilizados na equalização dos símbolos de dados [13]. O banco de equalizadores utiliza as informações provenientes do estimador e interpolador para ajustar separadamente a amplitude e fase de cada símbolo, de modo a possibilitar uma detecção coerente do símbolo transmitido [10],[8]. Na sequência os símbolos equalizados são colocados na forma serial e estimados pelo demodulador [3].

3. SISTEMA DE ESTIMAÇÃO, INTERPOLAÇÃO E EQUALIZAÇÃO

Para que o conjunto estimador, interpolador e equalizador possam trabalhar corretamente é necessário que a ortogonalidade entre as sub-portadoras seja mantida. Para isto, no domínio do tempo é adicionado ao símbolo OFDM o PC [8]. Portanto, no receptor cada sub-portadora recebida pode ser descrita através de uma equação no domínio da frequência que relaciona a sub-portadora enviada e a resposta em frequência do canal. Neste artigo $Y_k(f)$ representa a k -ésima sub-portadora recebida no domínio da frequência no receptor do sistema descrito pela Figura 1, devido a característica de ortogonalidade entre as sub-portadoras podemos dizer que $H_k(f)$ representa a k -ésima resposta em frequência do canal, ou seja, a parte da resposta em frequência do canal na frequência da k -ésima sub-portadora. $X_k(f)$ representa a k -ésima sub-portadora transmitida.

A relação entre a k -ésima resposta em frequência do canal e a k -ésima sub-portadora transmitida pode ser descrita por

$$Y_k(f) = H_k(f)X_k(f) \quad (1)$$

As sub-portadoras ao atravessarem um canal com múltiplos percursos irão sofrer diferentes atenuações e rotações de fase devido as características de seletividade do canal, porém a característica de ortogonalidade das sub-portadoras permite que no domínio da frequência cada sub-portadora possa ser tratada de forma independente [8]. O papel do equalizador é ajustar separadamente a amplitude e fase de cada sub-portadora de modo a possibilitar uma detecção coerente do símbolo transmitido [8],[13]. Para isto, o equalizador deve obter o coeficiente $\hat{H}_k(f)$ que representa a k -ésima resposta em frequência do canal estimada. Este coeficiente é obtido pelo conjunto estimador e interpolador. O equalizador utiliza $\hat{H}_k(f)$ para calcular o k -ésimo coeficiente de equalização ($E_k(f)$) [12] que pode ser representado por

$$E_k(f) = \frac{1}{\hat{H}_k(f)} \quad (2)$$

Cada coeficiente de equalização é multiplicado por uma sub-portadora recebida ($Y_k(f)$), o resultado desta operação são as sub-portadoras equalizadas no domínio da frequência ($\hat{Y}_k(f)$) que poderão ser processados por um detector coerente. Esta operação pode ser descrita por

$$\hat{Y}_k(f) = E_k(f)Y_k(f) \quad (3)$$

4. SIMULAÇÕES NÚMERICAS E ANÁLISE DOS DADOS

Nesta seção serão realizadas simulações numéricas para a análise dos efeitos da variação do número de sub-portadoras pilotos transmitidas no processo de estimação, interpolação e equalização realizado no receptor de um sistema OFDM. Para estas simulações no receptor do sistema foi implementada a interpolação por função cúbica [4].

A resposta impulsiva do canal de comunicação utilizado nesta investigação é ilustrada pela Figura 2.

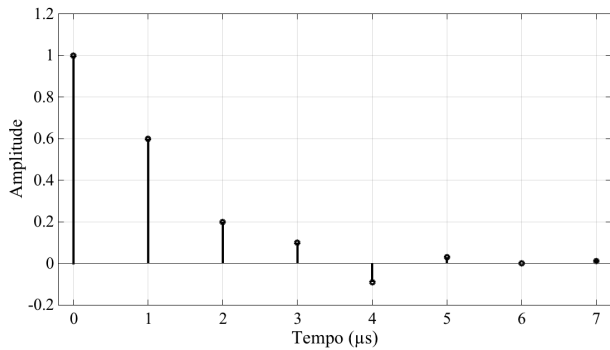


Figura 2. Resposta impulsiva do canal utilizado nas simulações.

A modulação empregada pelas sub-portadoras piloto é a BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), já as portadoras de dados são mapeadas pela QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*). A relação E_b/N_0 (Energia de bit pela densidade espectral de ruído) é configurada em 70dB para melhor expor a proposta deste artigo, que é investigar a influência no número de sub-portadoras pilotos no processo de estimação, interpolação e equalização. Em ambos cenários de simulação são transmitidas 4096 sub-portadoras e a técnica de interpolação utilizada é a cúbica [4].

Cenário 1

O número de sub-portadoras piloto está configurado em 1 para 500, ou seja, a cada 500 sub-portadoras de dados, é transmitida uma sub-portadora piloto, portanto são transmitidas 10 sub-portadoras piloto. Neste cenário foi escolhido o símbolo $S_1 = -1 + j$, para observação do espalhamento dos símbolos estimados causado pela falta de informação na estimação da resposta em frequência do canal. Este símbolo foi mapeado em sub-portadoras e transmitido no canal cuja resposta impulsiva é ilustrada pela Figura 2. A Figura 3 mostra o símbolo S_1 estimado após o processo de equalização.

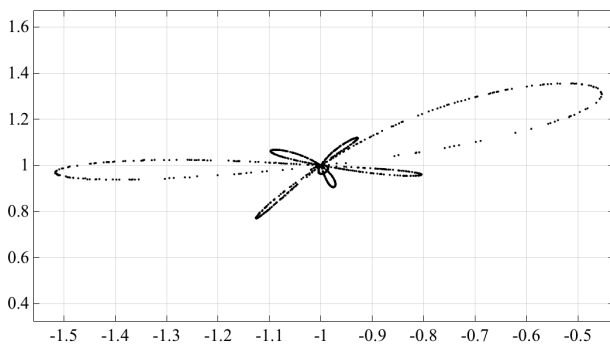


Figura 3. Símbolo $-1+j$ estimado após o processo de equalização.

O espalhamento dos símbolos estimados é causado pela diferença entre a resposta em frequência estimada e a resposta em frequência real do canal, logo, no processo de equalização as sub-portadoras são (no domínio da frequência) multiplicadas por coeficientes de equalização que não são exatamente o inverso da resposta do canal na frequência da sub-portadora, e assim geram um erro no processo de estimação do símbolo recebido.

No eixo horizontal das Figuras 3 e 5 estão representados os valores reais e no eixo vertical os valores imaginários. Cada ponto representa um símbolo estimado após o processo de

equalização no domínio da frequência. Observa-se que os símbolos estimados não estão centralizados no valor de S_1 devido ao erro gerado no processo de estimação.

A resposta em frequência do canal de comunicação e a resposta em frequência do canal estimado estão ilustrados pela Figura 4. Observa-se que as curvas não estão alinhadas em função da relação de sub-portadoras 1 para 500 ser insuficiente para o processo de estimação e interpolação ser preciso.

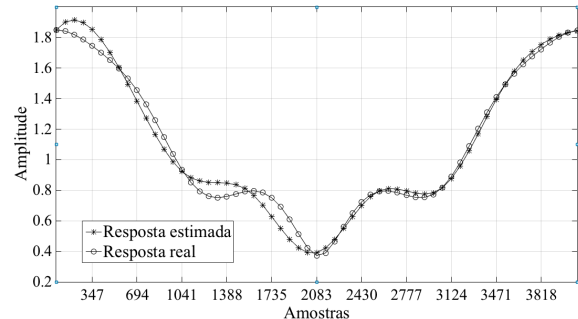


Figura 4. Módulos das respostas em frequência.

Cenário 2

O número de sub-portadoras piloto está configurado em 1 para 50, portanto são transmitidas 83 sub-portadoras piloto. Neste cenário, para observação do espalhamento dos símbolos estimados foi escolhido o mesmo símbolo $S_1 = -1 + j$. Este símbolo foi mapeado em sub-portadoras e transmitido no mesmo canal utilizado no cenário 1. A Figura 5 mostra o símbolo S_1 estimado após o processo de equalização.

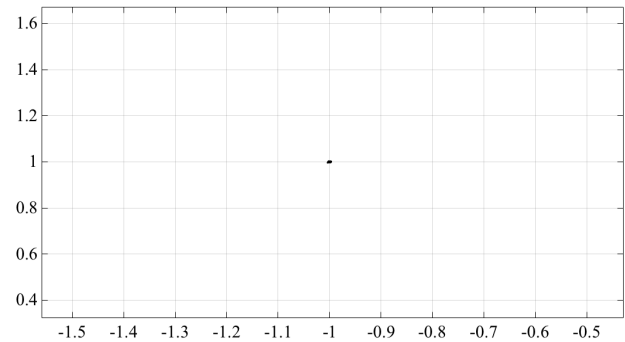


Figura 5. Símbolo $-1+j$ estimado após o processo de equalização.

O espalhamento causado pelo erro de estimação do símbolo S_1 no cenário 2 é nitidamente menor do que no cenário 1, porém ainda é presente. A resposta em frequência do canal e a resposta em frequência do canal estimada são ilustrados pela Figura 6.

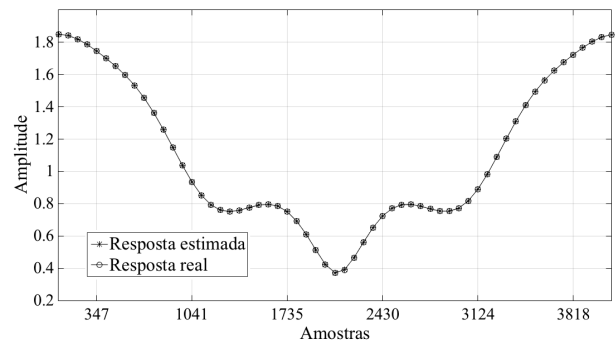


Figura 6. Módulos das respostas em frequência.

Neste caso, observa-se que as curvas estão alinhadas, isto ocorre pois, em comparação ao cenário 1, mais sub-portadoras piloto são transmitidas, e logo existe mais informação sobre o comportamento do canal presente no processo de estimação.

Observa-se um erro na estimação da resposta em frequência do canal em ambos cenários. O erro é visualizado mais claramente no cenário 1, porém ele também existe no cenário 2. Este erro pode ser mensurado através do cálculo do erro quadrático médio [4], que é dado por

$$Erro_{est} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N \{H_k(f) - \hat{H}_k(f)\}^2}}{N} \quad (4)$$

onde $H_k(f)$ e $\hat{H}_k(f)$ representam, respectivamente, a k -ésima resposta em frequência do canal real e k -ésima resposta em frequência estimada. N representa o número de sub-portadoras transmitidas.

Para o primeiro cenário o erro de estimação é de aproximadamente $9,0674 \times 10^{-4}$. Para o segundo cenário o erro calculado é de aproximadamente $5,2119 \times 10^{-6}$, ou seja, o erro diminuiu de aproximadamente 99,4% do cenário 1 para o cenário 2. Porém, do cenário 1 (10 pilotos) para o cenário 2 (83 pilotos) ocorre um aumento no número de sub-portadoras piloto de aproximadamente 730%.

5. CONCLUSÃO

Neste estudo foi explorado o efeito causado pela variação do número de sub-portadoras piloto transmitidas no processo de estimação da resposta em frequência do canal, e na equalização dos símbolos recebidos em um sistema OFDM genérico.

Através das simulações realizadas observou-se que um aumento de 730% no número de sub-portadoras piloto transmitidas acarretou em uma diminuição no erro de estimação da resposta em frequência do canal de aproximadamente 99,4%. Conclui-se que para um sistema operando com uma modulação de baixa ordem e relação sinal ruído na ordem de 70dB é mais vantajoso utilizar um espaçamento entre as sub-portadoras piloto de ordem proposta pelo cenário 1, pois assim a vazão de dados úteis é otimizada. Porém, para uma modulação de ordem elevada ou baixa relação sinal ruído, um menor espaçamento entre as sub-portadoras piloto pode levar o sistema a um melhor desempenho. Logo, conclui-se existe uma relação de compromisso entre a vazão e a quantidade de sub-portadoras piloto adicionadas ao processo de estimação, interpolação e equalização.

Este estudo poderá contribuir para pesquisas e projetos de receptores para sistemas OFDM, pois expõe os efeitos causados pela variação no número de sub-portadoras piloto no processo de estimação da resposta em frequência do canal de comunicação e na equalização e detecção coerente dos símbolos transmitidos.

6. REFERÊNCIAS

- [1] N. I. Khan; J. Alam, "Efficient Scheme for Channel Estimation in OFDM System", *Journal of Networks*, Vol. 9, No. 12, 2014, pp. 3192-3199.
- [2] S. Armour; A. Nix; D. Bull, "Performance Analysis of a Pre-FFT Equalizer Design for DVB-T". *Proceedings of the IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 45, No. 3, 1999.
- [3] D. A. Guimarães; R. A. A. Souza, *Transmissão Digital: Princípios e Aplicações*, 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.

- [4] C. A. Rocha, *Métodos de Interpolação para Sistemas OFDM*. Monografia (Mestrado em Telecomunicações) – Instituto Nacional de Telecomunicações. Santa Rita do Sapucaí. 2007.
- [5] K. Gnanishivaram; S. Neeraja, "FFT/IFFT Processor Design for 5G MIMO OFDM Systems", *International Journal of Wireless Communications and Networking Technologies*, India, Vol. 3, No. 3, 2014, p. 54-60.
- [6] G. P. Aquino, "Perspectivas para o 5G", *RTI. Redes, Telecom e Instalações*, Vol. 15, 2015, pp. 42-49.
- [7] M. Engels, *Wireless OFDM Systems: How to make them work?*, 1. ed. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [8] A. R. S. Bahai; B. R. Saltzberg, *Multi-Carrier Digital Communications: Theory and Applications of OFDM*, New York: Kluwer Academic/Plenum, 1999.
- [9] R. Prasad, *OFDM for Wireless Communications Systems*. Boston, Londres: Artech House, 2004.
- [10] F. A. C. M. Cardoso; E. M. Lopes; D. S. Arantes, "Algoritmo concorrente com decisão suave para equalização em sistemas OFDM no domínio da frequência", *XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES - SBR'08*, Rio De Janeiro, 2008, pp. 1-6.
- [11] A. Ligata; et al. "Closed-form BER Expression for OFDM with Pilot-assisted Channel Estimation in a Nonlinear Multipath Fading Channel", 2010, *IEEE*. p. 441-445.
- [12] Y. S. Cho; et al. *MIMO-OFDM: Wireless Communications with MATLAB*, Singapore: John Wiley & Sons, 2010.
- [13] C. A. Rocha; L. L. Mendes; A. C. Silveira, "Performance Analysis of Channel Estimation Schemes for OFDM Systems". *International Workshop on Telecommunications*, Santa Rita do Sapucaí, Brasil, 2007.